

養分収支モデルの改良による愛知県の畑土壌における 可給態リン酸含量と交換性カリウム含量の予測

中村嘉孝¹⁾・山本 拓²⁾・久野智香子³⁾・大橋祥範⁴⁾・安藤 薫⁴⁾・大竹敏也⁴⁾

摘要: 愛知県の畑土壌における可給態リン酸含量及び交換性カリウム含量の変化を予測する技術の確立に向けて、養分収支に基づいたモデルを改良した。可給態リン酸では、可給態として残存する割合を表す消長係数を土壌で0.90とし、各投入成分ではリン酸吸収係数に応じて変化させた。交換性カリウムでは、土壌及び各投入成分の消長係数は土性や家畜ふん堆肥の種類に応じた値とした。また、交換性カリウムについては下限値の条件式を追加した。土性、礫含量及び有機質資材の施用歴が異なる現地ほ場において、改良した新モデルを用いたそれぞれの予測値は実測値と概ね同様の变化傾向を示した。

キーワード: 畑土壌、消長係数、可給態リン酸、交換性カリウム、養分収支モデル

Prediction of Available Phosphate and Exchangeable Potassium in Upland Fields of Aichi Prefecture using an Improved Nutrient Balance Model

NAKAMURA Yoshitaka, YAMAMOTO Taku, KUNO Chikako,
OHASHI Yoshinori, ANDO Kaori and OTAKE Toshiya

Abstract: A model based on nutrient balance was improved to establish a technique for predicting the available phosphate and exchangeable potassium content in upland fields in Aichi Prefecture. The coefficients of the remaining plant-available forms were modified as follows: the coefficient of the remaining available phosphate was set to 0.90. Phosphate input varied according to the phosphate absorption coefficient. The residual coefficients for soil and each input component for the exchangeable potassium content were based on soil properties and the type of livestock manure and a conditional equation for the lower limit was added. The improved nutrient balance model showed generally similar trends to the measured data at field sites with different soil properties, gravel contents, and histories of organic material application.

Key Words: Upland fields, The coefficient of remaining, Available phosphate, Exchangeable potassium, Nutrient balance model

¹⁾環境基盤研究部(現普及戦略部) ²⁾東三河農業研究所 ³⁾環境基盤研究部(現作物研究部)
⁴⁾環境基盤研究部

緒言

リン酸とカリウムは植物の必須元素であり、肥料として施用される。しかし、リン酸とカリウムの肥料原料は世界的に偏在しており、それらの経済可採埋蔵量は有限である。日本はリン酸とカリウムの肥料原料のほとんどを輸入しているが、肥料原料の輸入価格は2021年以降上昇傾向で生産者の経営を圧迫している¹⁾。また、リン酸は水系の富栄養化の要因の1つであり、近隣の水系へ流出した場合、環境負荷につながる懸念される。これらのことから、リン酸とカリウムの適切な施肥管理は、持続的な農業生産の実現において重要である。農林水産省は、食料・農林水産業の生産力向上と持続性の両立を実現するため、2021年に「みどりの食料システム戦略」を策定し、「2050年までに輸入原料を用いた化学肥料の使用量を30%低減する」との目標を掲げて、有機物の循環利用や施肥の効率化を進めている¹⁾。

愛知県内の主要な野菜栽培における施肥量、作物吸収量及び栽培後の土壌の化学性を調査した報告²⁾において、リン酸施肥量は作物吸収量よりも多く、土壌の可給態リン酸含量が土壌診断基準を超える地点は多かった。一方、カリウム施肥量は作物吸収量よりも少なく、土壌のカリウムの可給態画分である交換性カリウム含量が土壌診断基準以下の地点は多かった。適切な施肥管理に向けて、土壌の各可給態画分の含量を考慮して施肥量を加減し、肥料成分が土壌へ過剰に蓄積することを防ぐとともに、その有効活用を図る必要がある。特に、愛知県における畑土壌は水田土壌に比べてリン酸が著しく蓄積しており³⁾、土壌に蓄積したリン酸を考慮した施肥管理が求められる。また、家畜ふん堆肥に含まれるリン酸やカリウムは化学肥料の代替が可能である^{4,5)}が、堆肥中の各成分含有量は窒素に対して多く、作物吸収量との不均衡から余剰が生じて土壌に蓄積しやすい⁶⁾。家畜ふん堆肥の施用によって土壌に蓄積する可給態画分の中長期的な変化が把握できれば、化学肥料を低減する量や期間が明らかになるため、施肥の効率化や家畜ふん堆肥の施用意欲の向上が期待される。

北村^{7,8)}は、1作ごとの土壌の可給態リン酸含量または交換性カリウム含量の変化について、養分収支に基づいた簡易なモデル(以下、「旧モデル」)で予測可能であることを報告している。しかし、旧モデルでは、可給態リン酸の消長係数(流出や固定化され不可給化する割合を差し引いた値)を土壌種ごとに設定しており^{7,8)}、同じ土壌種であっても土壌のリン酸の吸着特性が異なる場合のモデルの適合性については未検討である。また、旧モデルでは、カリウムの収支が数年に渡って連続して負となると予測値は負の値を示す^{7,8)}。交換

性カリウム含量や交換性マグネシウム含量の予測においては、旧モデルの消長係数を土性や家畜ふん堆肥の種類によって変更し、下限値の条件式を追加することで、年次変化を予測できることが示されている⁹⁾ことから、可給態リン酸含量及び交換性カリウム含量の予測においても旧モデルの改良が可能と考えられる。

そこで、本研究では愛知県の畑土壌における可給態リン酸含量及び交換性カリウム含量の予測に基づいた土壌管理技術の確立に向けて、旧モデルを改良するとともに、その現地適合性を検証した。

材料及び方法

1 可給態リン酸含量及び交換性カリウム含量の予測に向けた養分収支モデルの改良

(1) 供試データ

試験データは、愛知県農業総合試験場(愛知県豊橋市、長久手市及び安城市)において、土性や有機質資材の種類とその施肥量が異なる黄色土で実施された3試験のデータ^{4,5,9,11-14)}を用いた(表1～表8)。

(2) 旧モデルによる可給態リン酸含量及び交換性カリウム含量の予測

既報⁸⁾に準じて、旧モデルを用いて可給態リン酸含量及び交換性カリウム含量の変化を予測した。すなわち、可給態リン酸含量に関する消長係数は、黒ボク土以外に適用される値(土壌の可給態画分1.00、施肥成分0.60、施用有機質資材の成分0.60、かんがい水の成分1.00)とした。交換性カリウム含量に関する消長係数は、頁岩風化土以外に適用される値(土壌の可給態画分0.80、施肥成分0.80、施用有機質資材の成分0.90、かんがい水の成分1.00)とした。各試験とも1年で2作栽培したことから、2作ごとの予測値を1年ごとの予測値とした。

(3) 新モデルへの改良

可給態リン酸含量及び交換性カリウム含量の予測は、北村⁸⁾に準じた養分収支に基づいた推定式に、下記の変更を行ったモデルを用いて算出した(式①と式②または式③を組み合わせたモデル。以下、「新モデル」)。式①は、既報⁷⁾で追加の必要性が指摘されている降雨画分を新たに加え、予測期間を1作毎ではなく1年単位とした。降雨の成分について、リン酸の数値は安城市で測定された報告値¹⁵⁾を、カリウムは愛知県内で実施された酸性雨等調査結果¹⁶⁾から豊橋市及び安城市のほ場は「刈谷市」、長久手市のほ場は「名古屋市」の2003年から2019年の平均値を用いた。

表1 養分収支モデルの改良に用いた試験土壌の概要

試験番号	試験地	土壌 ¹⁾	解析年(年)	土性	粘土含量(%)	作土深(cm)	リン酸吸収係数 ³⁾
試験1	豊橋市	黄色土	2005-2019 ²⁾	細粒質	40.0	20	1190
試験2	長久手市	黄色土	2002-2020	中粗粒質	5.0	20	116
試験3	安城市	黄色土	1975-1980	細粒質	23.9	13	600

1) 農耕地土壌分類委員会(1995)¹⁰⁾

2) 一部の処理区は2013年または2014年まで解析した

3) 消長係数の算出に用いたリン酸吸収係数(mg-P₂O₅ 100 g⁻¹)

$$\text{式①: } Y = SB \cdot Sk + (FB \cdot Fk + OB \cdot Ok + WB \cdot Wk + RB \cdot Rk - PU) / (\rho \cdot D \cdot 1000)$$

Y:1年後の土壌の可給態画分の含量(g kg⁻¹)

SB:予測開始時の土壌の可給態画分の含量(g kg⁻¹)

Sk:土壌の可給態画分の消長係数

FB:化学肥料の成分量(g m⁻²)

Fk:化学肥料の成分の消長係数

OB:施用有機質資材の成分量(g m⁻²)

Ok:施用有機質資材の成分の消長係数

WB:かんがい水の成分量(g m⁻²)

Wk:かんがい水の成分の消長係数

RB:降雨の成分量(g m⁻²)

Rk:降雨の成分の消長係数

PU:作物による成分の吸収量(g m⁻²)

ρ :乾燥密度(g cm⁻³)

D:作土深(m)

可給態リン酸含量では、新モデルの式①における化学肥料の成分、施用有機質資材の成分、かんがい水の成分及び降雨の成分の消長係数を、過りん酸石灰を露地畑条件下で培養後に可給態リン酸として回収された割合と土壌のリン酸吸収係数との関係式¹⁷⁾を改良して算出した。ただし、この可給態リン酸として回収された割合を求めるための培養期間は3か月で¹⁷⁾、新モデルにおける予測期間の1年間よりも短い。このため、投入される各成分のリン酸は回収された後も溶脱や土壌の吸着といった影響を受けると考えられる。そこで、3か月以降の投入される各成分のリン酸は土壌の可給態リン酸とみなし、既報の関係式¹⁷⁾で求められる可給態リン酸として、回収された割合に土壌の可給態画分の消長係数を乗じた値とした(式②)。

$$\text{式②: } A = (-0.00032x + 0.724) \cdot Sk$$

A:消長係数

x:リン酸吸収係数(mg-P₂O₅ 100g⁻¹)

Sk:土壌の可給態画分の消長係数

そして、試験1、試験2及び試験3において、式①と式②のSkを1.00から0.01単位ごとに減少させて、全ての処理区における可給態リン酸含量の実測値と予測値の残差平方和が最小となった時の値を土壌の可給態画分の消長係数とした。

交換性カリウム含量では、旧モデルにおいて予測値が負の値を示す場合があること^{7,8)}から、下限値を補正する条件式(式③)を式①に追加した。補正する下限値は、供試データで最も交換性カリウム含量が少なかった試験3の化学肥料区のデータから、陽イオン交換容量(CEC)に対する交換性カリウムの割合を表す交換性カリウム飽和度で1.8%とした。この下限値とした交換性カリウム飽和度の予測に必要なCECは、既報⁹⁾に準じて算出した。すなわち、Rothamsted Carbon Model(RothCモデル)バージョンRothC-26.3¹⁸⁾を用いて、土壌全炭素含量の予測値を算出し¹⁹⁾、土壌全炭素含量の1.000 g kg⁻¹の変化に対するCECの変化を0.288 cmol_c kg⁻¹としてCECの予測値を求めた⁹⁾。そして、予測したCECの1.8%に相当する交換性カリウム含量を各年の下限値とした。

$$\text{式③: 式①の予測値} \geq \text{下限値*の場合} \rightarrow \text{式①の予測値} \\ \text{式①の予測値} < \text{下限値の場合} \rightarrow \text{下限値}$$

*下限値:CECの予測値から交換性カリウム飽和度1.8%として算出した交換性カリウム含量(g kg⁻¹)

交換性カリウム含量に関する消長係数の改良は、中村ら⁹⁾と同様の手順で行った。すなわち、土性が同じ細粒質の試験1及び試験3と、中粗粒質の試験2で分けて、消長係数の改良を行った。まず、有機質資材を無施用とした試験1の家畜ふん堆肥無施用区と試験3の化学肥料区、または試験2の堆肥無施用区データを用いて、新モデルの式①における予測開始時の土壌の可給態画分、化学肥料の成分、かんがい水の成分及び降雨の成分の消長係数を、0.00以上1.00未満の範囲で0.01単位ごとに変えて、実測値と予測値の残差平方和が最小となる値とした。次に、上記で得られた消長係数を用いて、試験1~3で家畜ふん堆肥を施用した区から、土壌の可給態画分の含量と、家畜ふん堆肥の成分につ

表2 養分収支モデルの改良に用いた試験の概要

試験番号	処理区 ¹⁾	栽培品目 (栽培月間)	有機質資材		
			資材名	施用量 ²⁾ (t ha ⁻¹)	施用月 (月)
試験1	牛ふん堆肥 7.5t 区	1 作目スイートコーン(5~7月)	牛ふん堆肥	7.5	8
	牛ふん堆肥 15t 区	2 作目キャベツ(9~1月)	牛ふん堆肥	15	8
	牛ふん堆肥 22.5t 区		牛ふん堆肥	22.5	8
	豚ふん堆肥 5t 区		豚ふん堆肥	5	8
	豚ふん堆肥 10t 区		豚ふん堆肥	10	8
	豚ふん堆肥 15t 区		豚ふん堆肥	15	8
	牛ふん堆肥 45t/3y 区		牛ふん堆肥	45	8(3年に1回)
	家畜ふん堆肥無施用区		-	-	-
試験2	牛ふん堆肥区	1 作目スイートコーン(4~7月)	牛ふん堆肥	20	7~8
	豚ふん堆肥区	2 作目キャベツ(8~1月)	豚ふん堆肥	10	7~8
	堆肥無施用区		-	-	-
試験3	豚ふん堆肥 30t 区	1 作目ムギ(11~5月)	豚ふん堆肥	30*	11, 6
	化学肥料区	2 作目ソルガム(6~10月)	-	-	-

1) 処理区の名前は引用文献中の試験区名とは異なる

2) 1回当たりの施用量。印(*)がある場合は現物重、印(*)がない場合は乾物重を表す

いて、その消長係数を0.00以上1.00未満の範囲で0.01単位ごとに変えて、実測値と予測値の残差平方和が最小となる値を土壤の可給態画分または施用有機質資材の成分の消長係数として算出した。

2 現地ほ場における新モデルの適合性の検証

(1) 現地ほ場の概要

モデルの検証には、愛知県内において生産者が管理する同一ほ場での継続的な調査がされた畑土壤で、土壤の種類や管理が異なる3ほ場の作土の調査データ²⁰⁾を用いた(表9)。すなわち、木曾川の沖積地に位置する砂質な一宮市のほ場(作土の粘土含量は6%、土壤は中粒質普通褐色低地土、以下、「一宮・砂質」、露地野菜の生産が盛んな渥美半島の洪積台地に位置する田原市のほ場(土壤は細粒質台地

表3 試験1のリン酸の収支

項目	年	リン酸の収支(g-P ₂ O ₅ m ⁻²) ¹⁾							
		牛ふん堆肥				豚ふん堆肥			家畜ふん堆肥 無施用区
		7.5t区	15t区	22.5t区	45t/3y区	5t区	10t区	15t区	
化肥	2005-2007	21	21	21	21	21	21	21	21
	2008	17	5	5	5	0	0	0	25
	2009-2010	17	10	10	10	0	0	0	25
	2011	17	10	10	10	5	0	0	25
	2012-2013	18	10	10	10	5	0	0	25
	2014-2018	-	10	-	-	-	0	-	25
堆肥	2005	7	15	22	44	48	97	145	0
	2006	9	17	26	0	58	116	174	0
	2007	6	12	19	0	63	126	190	0
	2008	7	15	22	45	62	123	185	0
	2009	5	10	15	0	56	111	167	0
	2010	9	18	27	0	47	93	140	0
	2011	11	23	34	69	37	75	112	0
	2012	8	15	23	0	60	121	181	0
	2013	11	21	32	0	65	130	195	0
	2014	-	21	-	-	-	103	-	0
	2015	-	20	-	-	-	115	-	0
	2016	-	20	-	-	-	105	-	0
	2017	-	26	-	-	-	135	-	0
	2018	-	27	-	-	-	145	-	0
収穫物	2005	4	5	5	5	5	6	6	4
	2006	4	5	5	5	5	6	6	4
	2007	6	6	6	6	7	7	8	5
	2008	6	7	6	7	7	8	8	6
	2009	5	6	6	6	6	7	7	5
	2010	4	6	7	4	7	7	8	5
	2011	2	2	3	2	3	2	3	2
	2012	5	5	5	3	6	7	7	5
	2013	4	6	4	3	5	8	5	5
	2014	-	7	-	-	-	8	-	6
	2015	-	8	-	-	-	9	-	5
	2016	-	6	-	-	-	7	-	4
	2017	-	5	-	-	-	6	-	4
	2018	-	4	-	-	-	4	-	2
余剰	2005	24	30	37	59	64	112	160	16
	2006	25	33	42	15	74	131	189	17
	2007	21	27	33	14	77	140	202	15
	2008	19	13	21	42	54	115	176	19
	2009	18	14	19	4	50	104	160	20
	2010	22	22	30	6	40	86	133	20
	2011	27	31	42	77	40	73	109	23
	2012	20	20	28	7	60	113	175	20
	2013	24	25	37	7	65	122	190	20
	2014	-	24	-	-	-	94	-	19
	2015	-	22	-	-	-	106	-	20
	2016	-	24	-	-	-	98	-	21
	2017	-	31	-	-	-	128	-	21
	2018	-	33	-	-	-	141	-	23

1) 表中の「-」は試験中止を表す

余剰＝化肥(化学肥料由来の投入量)＋堆肥(施用有機質資材由来の投入量)－収穫物(作物による収奪量)

褐色森林土、以下、「田原・細粒質」)、同じ渥美半島の先端部に位置する礫質な田原市のほ場(作土の礫含量の断面割合は「すこぶる富む(20%から50%)」で礫を除いた乾燥密度は 0.35 g cm^{-3} 、土壌は礫質普通未熟低地土、以下、「田原・礫質」)の調査データを用いた。

(2) 新モデルの適合性の検証

可給態リン酸含量及び交換性カリウム含量の変化は、1(3)で作成した新モデルを用いて算出した。降雨の成分につい

て、リン酸は安城市で測定された報告値¹⁵⁾、カリウムは愛知県内で実施された酸性雨等調査結果¹⁶⁾から一宮・砂質は「名古屋市」、田原・細粒質及び田原・礫質は「刈谷市」の2003年から2019年の平均値を用いた。

3 実測値と予測値の適合性の評価

各可給態画分の実測値と各モデルの予測値の二乗平均平方根誤差(RMSE)を算出し、適合性を評価した。

表4 試験1のカリウムの収支

項目	年	カリウムの収支($\text{g-K}_2\text{O m}^{-2}$) ¹⁾							
		牛ふん堆肥				豚ふん堆肥			家畜ふん堆肥 無施用区
		7.5t区	15t区	22.5t区	45t/3y区	5t区	10t区	15t区	
化肥	2005-2007	55	55	55	55	55	55	55	55
	2008	30	0	0	0	45	30	15	60
	2009-2010	45	15	15	15	45	30	30	60
	2011-2013	40	13	13	13	40	25	25	55
	2014-2018	-	13	-	-	-	25	-	55
堆肥	2005	19	38	57	115	30	60	90	0
	2006	24	48	73	0	25	50	75	0
	2007	19	38	57	0	26	53	79	0
	2008	20	41	61	122	25	50	74	0
	2009	16	32	48	0	24	47	71	0
	2010	28	56	84	0	24	48	72	0
	2011	29	59	88	177	19	39	58	0
	2012	20	39	59	0	22	43	65	0
	2013	27	53	80	0	22	44	66	0
	2014	-	54	-	-	-	41	-	0
	2015	-	36	-	-	-	42	-	0
	2016	-	40	-	-	-	42	-	0
	2017	-	68	-	-	-	50	-	0
	2018	-	56	-	-	-	47	-	0
収奪量	2005	18	20	18	15	18	19	20	17
	2006	21	22	20	16	20	20	23	20
	2007	23	26	23	19	24	24	27	22
	2008	26	27	24	21	28	26	29	25
	2009	21	24	24	17	21	26	26	21
	2010	20	23	24	18	25	24	25	22
	2011	10	10	10	6	10	9	11	10
	2012	25	26	26	13	25	28	28	24
	2013	19	23	18	13	18	24	19	21
	2014	-	27	-	-	-	29	-	24
	2015	-	33	-	-	-	33	-	28
	2016	-	22	-	-	-	24	-	20
	2017	-	20	-	-	-	21	-	17
	2018	-	18	-	-	-	16	-	15
余剰	2005	56	74	94	155	67	95	125	38
	2006	58	81	107	39	60	85	108	35
	2007	51	67	89	36	57	84	107	33
	2008	24	13	37	101	42	54	60	35
	2009	40	23	39	-2	48	51	75	39
	2010	53	47	75	-3	44	53	77	38
	2011	60	62	91	184	49	54	72	45
	2012	34	26	46	0	36	41	61	31
	2013	48	43	74	0	44	44	72	34
	2014	-	39	-	-	-	37	-	31
	2015	-	15	-	-	-	34	-	27
	2016	-	31	-	-	-	43	-	35
	2017	-	60	-	-	-	54	-	38
	2018	-	51	-	-	-	56	-	40

1) 表中の「-」は試験中止を表す

余剰=化肥(化学肥料由来の投入量)+ 堆肥(施用有機質資材由来の投入量)- 収獲物(作物による収奪量)

4 土壌化学性の分析方法

可給態リン酸含量はトルオーグ法²¹⁾で抽出し、交換性カリウム含量は1 mol L⁻¹酢酸アンモニウム液で抽出して測定²¹⁾された報告値^{4,5,9,11-14)}または試験の継続により得られた調査値を用いた。リン酸吸収係数は25 g L⁻¹リン酸アンモニウム液を添加して24時間後に減少したリン酸(P₂O₅)量を土壌100 g当たりのmgで表した値を用いた。

結果及び考察

1 可給態リン酸含量及び交換性カリウム含量の予測に向けた養分収支モデルの改良

(1) 可給態リン酸

ア 旧モデルによる予測値と予測精度性

試験1及び試験2の各処理区における旧モデルの予測値

表5 試験2のリン酸の収支

年	リン酸の収支(g-P ₂ O ₅ m ⁻²)											
	牛ふん堆肥区				豚ふん堆肥区				堆肥無施用区			
	化肥	堆肥	収穫物	余剰	化肥	堆肥	収穫物	余剰	化肥	堆肥	収穫物	余剰
2002	20	32	16	36	19	174	17	176	21	0	16	6
2003	23	40	16	47	23	166	17	171	23	0	15	8
2004	23	50	13	59	23	52	17	57	23	0	14	9
2005	22	47	17	53	22	75	17	80	22	0	16	6
2006	11	59	10	60	11	96	11	95	22	0	12	10
2007	0	47	8	39	0	82	7	75	22	0	7	15
2008	0	95	6	89	0	109	7	102	22	0	6	16
2009	0	50	5	45	0	101	8	93	21	0	4	17
2010	0	69	5	63	0	85	6	79	21	0	5	16
2011	0	49	4	45	0	65	6	59	21	0	5	16
2012	0	76	7	70	0	61	7	53	21	0	6	15
2013	0	18	6	12	0	77	8	69	21	0	7	14
2014	0	18	6	12	0	55	9	46	21	0	7	14
2015	0	26	9	17	0	77	10	67	21	0	10	11
2016	0	23	9	15	0	75	9	66	21	0	8	13
2017	0	24	7	17	0	70	7	63	21	0	7	14
2018	0	25	6	20	0	64	6	58	21	0	6	15
2019	0	22	5	17	0	72	5	67	21	0	6	15
2020	0	23	3	20	0	59	4	54	11	0	3	8

余剰＝化肥(化学肥料由来の投入量) + 堆肥(施用有機質資材由来の投入量) - 収穫物(作物による収奪量)

表6 試験2のカリウムの収支

年	カリウムの収支(g-K ₂ O m ⁻²)											
	牛ふん堆肥区				豚ふん堆肥区				堆肥無施用区			
	化肥	堆肥	収穫物	余剰	化肥	堆肥	収穫物	余剰	化肥	堆肥	収穫物	余剰
2002	57	47	50	53	54	87	51	90	59	0	50	9
2003	60	75	56	79	60	90	55	95	60	0	48	12
2004	60	84	24	120	60	33	32	62	60	0	23	37
2005	60	80	64	77	60	25	60	24	60	0	50	11
2006	30	87	34	83	30	48	33	45	60	0	34	26
2007	0	68	27	41	0	36	23	12	60	0	27	33
2008	0	71	26	45	0	43	28	15	60	0	26	34
2009	0	109	17	92	0	37	24	12	55	0	13	42
2010	0	118	20	97	0	46	22	25	55	0	20	35
2011	0	85	11	74	0	28	15	13	55	0	14	41
2012	0	62	16	46	0	24	16	8	55	0	16	40
2013	0	39	15	24	0	29	18	11	55	0	19	37
2014	0	44	14	30	0	21	20	2	55	0	21	34
2015	0	55	19	36	0	32	24	7	55	0	28	28
2016	0	48	25	23	0	28	23	5	55	0	25	30
2017	0	70	21	49	0	34	20	14	55	0	23	33
2018	0	81	22	60	0	35	23	12	55	0	25	30
2019	0	72	17	56	0	33	18	15	55	0	20	35
2020	0	65	14	52	0	32	16	16	55	0	13	42

余剰＝化肥(化学肥料由来の投入量) + 堆肥(施用有機質資材由来の投入量) - 収穫物(作物による収奪量)

は実測値より多く、それらの差は経時的に大きくなった(図1、図2)。旧モデルにおける土壌の可給態リン酸の消長係数は1.00である⁹⁾ため、余剰量が正であれば予測値は常に増加し続ける。しかし、試験1と試験2の各処理区の余剰量はいずれも正の値であったが、試験1の家畜ふん堆肥無施用区及

び試験2の各処理区の実測値は増加傾向を示さなかった。特に、試験2の牛ふん堆肥区及び堆肥無施用区の実測値は、試験途中または試験開始時から減少傾向を示した。試験2の中粗粒質な土壌において、2007年から2012年における堆肥無施用区は余剰量よりも多くのリン酸が溶脱していた

表7 試験3のリン酸の収支

年	リン酸の収支(g-P ₂ O ₅ m ⁻²)							
	豚ふん堆肥 30t 区				化学肥料区			
	化肥	堆肥	収穫物	余剰	化肥	堆肥	収穫物	余剰
1975	18	77	16	79	18	0	14	4
1976	18	59	9	68	18	0	7	11
1977	18	65	18	66	18	0	15	3
1978	18	57	29	45	18	0	23	-5
1979	18	91	19	90	18	0	12	6
1980	6	39	5	39	6	0	4	2

余剰 = 化肥(化学肥料由来の投入量) + 堆肥(施用有機質資材由来の投入量) - 収穫物(作物による収奪量)

表8 試験3のカリウムの収支

年	カリウムの収支(g-K ₂ O m ⁻²)							
	豚ふん堆肥 30t 区				化学肥料区			
	化肥	堆肥	収穫物	余剰	化肥	堆肥	収穫物	余剰
1975	22	35	25	32	22	0	25	-3
1976	22	38	54	6	22	0	32	-10
1977	22	36	61	-4	22	0	34	-12
1978	22	41	51	12	22	0	29	-7
1979	22	41	63	1	22	0	30	-8
1980	7	24	5	26	7	0	3	4

余剰 = 化肥(化学肥料由来の投入量) + 堆肥(施用有機質資材由来の投入量) - 収穫物(作物による収奪量)

表9 現地ほ場において施用された有機質資材と栽培品目

ほ場 年	有機質資材		栽培品目
	資材名	施用量(t ha ⁻¹) ¹⁾	
一宮・砂質(作土深は 20 cm、リン酸吸収係数は 189 mg-P ₂ O ₅ 100g ⁻¹)			
1982-1983	豚ふん堆肥	20	春ニンジン
1984-1999	麦稈	3	サトイモ、サツマイモ、冬コムギ
2000-2001	-	-	冬コムギ、サツマイモ
2002	牛ふん堆肥	30	冬コムギ、サツマイモ
2003-2019	-	-	春ダイコン、サツマイモ
田原・細粒質(作土深は 17 cm、リン酸吸収係数は 361 mg-P ₂ O ₅ 100g ⁻¹)			
1981-1994	-	-	未成熟トウモロコシ、冬キャベツ
1995-2003	牛ふん堆肥(3年に1回)	90	未成熟トウモロコシ
2004-2007	牛ふん堆肥(2年に1回)	60	冬キャベツ
2008-2012	牛ふん堆肥	30	冬キャベツ
2013-2018	牛ふん堆肥、鶏ふん	30、1.5	冬キャベツ
田原・礫質(作土深は 22 cm、リン酸吸収係数は 178 mg-P ₂ O ₅ 100g ⁻¹)			
1981-1983	牛ふん堆肥	20	未成熟トウモロコシ、冬キャベツ
1984-1988	鶏ふん	3.3、3.3	未成熟トウモロコシ、冬キャベツ
1989-1993	鶏ふん	4.5	冬キャベツ
1994-1998	バーク堆肥	200	未成熟トウモロコシ、冬キャベツ
1999-2003	稲わら	40、40	冬キャベツ
2004-2008	鶏ふん	3.3、3.3	未成熟トウモロコシ、冬キャベツ
2009-2012	牛ふん堆肥	40	未成熟トウモロコシ、冬キャベツ
2013-2016	鶏ふん、牛ふん堆肥	4.5、400	未成熟トウモロコシ、冬キャベツ
2017-2018	牛ふん堆肥	40	冬キャベツ

1) 1回当たりの現物施用量。複数の有機質資材を施用した場合は資材名の記載順に記載

ことが報告されており⁵⁾、可給態リン酸含量の実測値が減少傾向を示したことは余剰量を超える量のリン酸が溶脱していたためと考えられた。細粒質の土壌におけるリン酸の溶脱が中粗粒質な土壌と同程度かについては今後の検討課題であるが、いずれの土壌においても土壌の可給態リン酸そのものも減少するとして、土壌の可給態リン酸の消長係数の改良が必要であると考えられた。

投入されたリン酸の各成分の消長について、リン酸吸収係数が高いと施肥リン酸が可給態リン酸として土壌に残存する割合が低くなることが報告されている¹⁷⁾。したがって、土壌のリン酸吸収係数が $1190 \text{ mg-P}_2\text{O}_5 \text{ } 100\text{g}^{-1}$ と高かった試験1では、余剰のリン酸が可給態リン酸として土壌に残存した割合が試験2または試験3よりも低かったと考えられた。また、投入されるリン酸の形態の違いについてみると、牛ふん堆肥及び

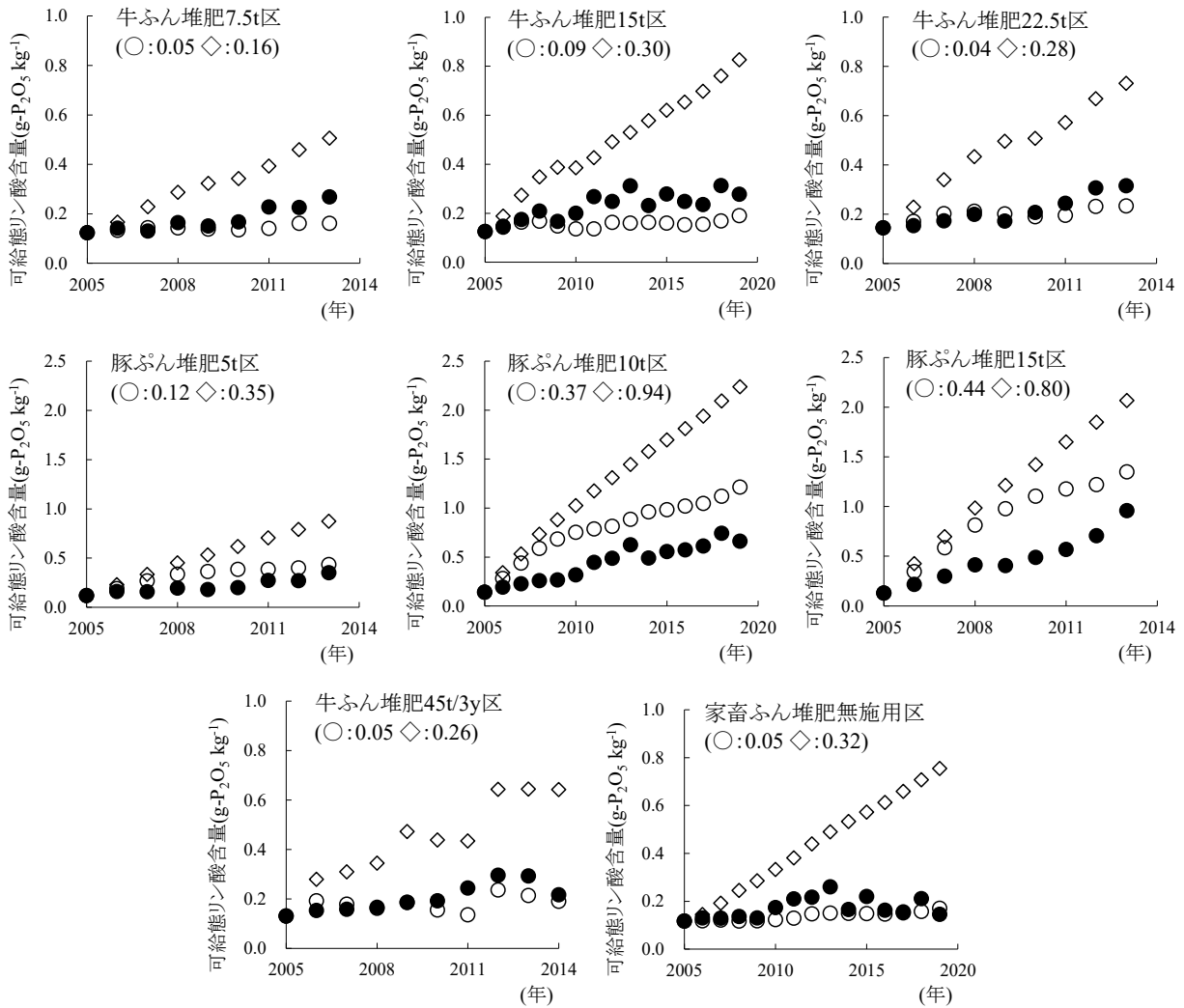


図1 試験1の可給態リン酸含量の実測値(●)、新モデル(○)と旧モデル(◇)の予測値の経時変化
括弧内は各モデルの予測値と実測値の RMSE を示す

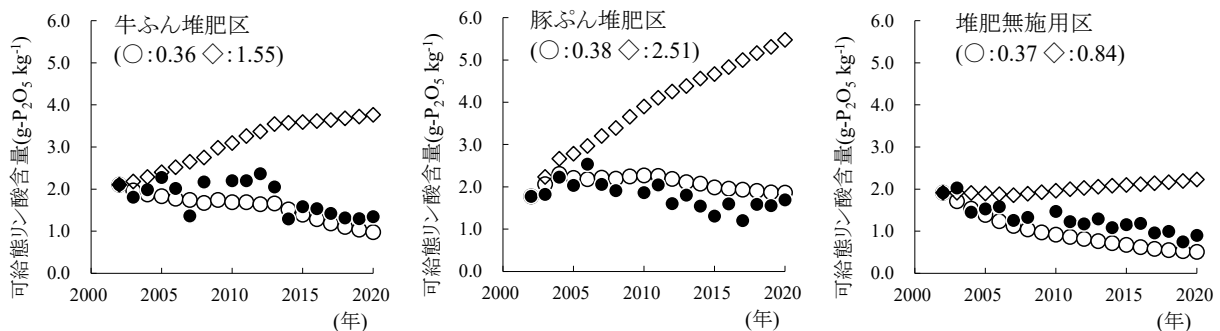


図2 試験2の可給態リン酸含量の実測値(●)、新モデル(○)と旧モデル(◇)の予測値の経時変化
括弧内は各モデルの予測値と実測値の RMSE を示す

豚ふん堆肥中の可溶性リン酸の割合はともに87%と高いことが報告されている²²⁾。このため、投入されたリン酸の形態が水溶性あるいは可溶性であるかによって可給態リン酸として土壌に残存する割合に影響したとも考えられる。しかし、北村ら¹⁷⁾は、愛知県内の4種類の畑土壌において、形態の異なる3種類のりん酸肥料を施肥し、3か月間露地畑条件下で培養後に可給態リン酸として回収された割合が、施肥リン酸の形態の違いよりも土壌のリン酸吸着特性を反映していたと報告している。これらのことから、ほ場に投入される各成分の消長係数は肥料や有機質資材の種類によって変えるのではなく、土壌のリン酸の吸着特性の指標とされるリン酸吸収係数に応じて変えるべきと考えられた。

イ 新モデルにおける消長係数と予測精度

新モデルにおける土壌の可給態画分の消長係数は0.90(表10)で1.00未満となった。また、試験2で投入される各成分の消長係数は0.62で、旧モデルにおける黒ボク土以外の土壌における消長係数(0.60)⁸⁾と同程度であったが、リン酸吸収係数の高かった試験1における投入される各成分の消長係数は0.31で低くなった。

試験3の各処理区の新モデルと旧モデルの各予測値は同程度であったが(図3)、試験1及び試験2の各処理区における新モデルの予測値と実測値のRMSEは旧モデルの予測値と実測値のRMSEよりも小さく、新モデルの方が旧モデルよりも実測値に近似した(図1、図2)。特に、実測値が減少傾向を示した試験2の牛ふん堆肥区及び堆肥無施用区において、新モデルの予測値は実測値と同様に減少傾向を示した。

これらのことから、養分収支モデルを用いた可給態リン酸含量の予測において、土壌の可給態リン酸の消長係数を0.90にすること、ほ場に投入される成分の消長係数をリン酸吸収係数に応じて変化させることにより、養分収支モデルの適合性は高まると考えられた。

(2) 交換性カリウム

ア 旧モデルによる予測値と予測精度

試験1と試験2と異なり(図4、図5)、試験3の化学肥料区における旧モデルの予測値は余剰量が負であったことを反映して1981年には負の値を示した(図6)。しかし、同区の実測値は減少傾向を示したものの、正の値を維持した。北村ら⁷⁾は、旧モデルの予測値が負の値を示しても、実測値は正の値を示した要因として、鉱物の風化によりカリウムが供給されたと考察している。また、安藤ら²³⁾は、愛知県露地畑における1 mol L⁻¹熱硝酸抽出法で評価される非交換性カリウム含量は全国平均よりも多いことを報告している。今回、カリウムの余剰量が継続して負であっても、土壌の交換性カリウム含量が正の値を維持したことは、交換性として評価される形態以外のカリウムが交換性に変化し、交換性カリウムとしての含有量が維持されたことが示唆された。旧モデルでは余剰量が負の値となる条件が継続すると予測値は負の値になってしまうため、適合性を高めるためには下限値を補正する条件式を組み込むことが必要であると考えられた。

試験1の各処理区における旧モデルの予測値と実測値のRMSEは0.08~0.28であったのに対し(図4)、試験2の各処理区における旧モデルの予測値と実測値のRMSEは0.13~

表 10 改良した養分収支モデルにおける消長係数

土壌特性	土性 ¹⁾	有機質資材	消長係数 ²⁾		
			Sk	Fk,Wk,Rk	Ok
可給態リン酸	-	-	0.90	A ³⁾	A ³⁾
交換性カリウム	細粒質	無し	0.76	0.76	-
		牛ふん堆肥	0.73	0.76	0.73
		豚ふん堆肥	0.68	0.76	0.68
	中粗粒質	無し	0.58	0.58	-
		牛ふん堆肥	0.49	0.58	0.49
		豚ふん堆肥	0.60	0.58	0.60

1) 細粒質:粘土含量>15%、中粗粒質:粘土含量≤15%

2) Sk:土壌の可給態画分、Fk:化学肥料の成分、Wk:かんがい水の成分、Rk:降雨の成分、Ok:施用有機質資材

3) A = (-0.00032 x + 0.724) · Sk (x:リン酸吸収係数、単位は「mg-P₂O₅ 100g⁻¹」、Sk:土壌の可給態画分)

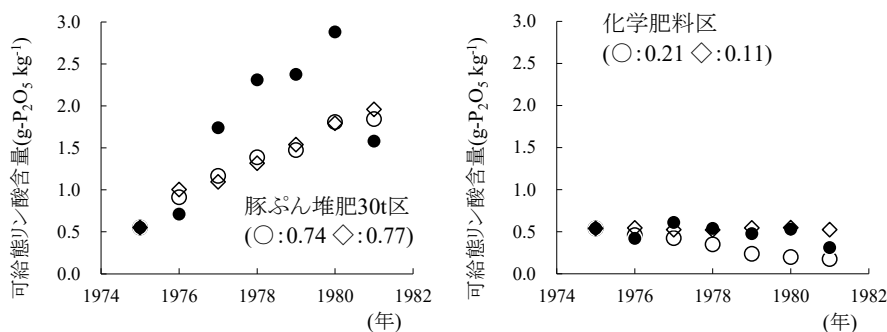


図3 試験3の可給態リン酸含量の実測値(●)、新モデル(○)と旧モデル(◇)の予測値の経時変化
括弧内は各モデルの予測値と実測値のRMSEを示す
1981年は1980年冬作(ムギ)跡地土壌

0.44と大きかった(図5)。これは、試験1の土壤は旧モデルの消長係数の適応条件⁸⁾の土壤である細粒質黄色土であったが、試験2の土壤は中粒粗質の黄色土で適応条件ではなかったためと考えられた。特に、試験2の牛ふん堆肥区や2012年までの豚ふん堆肥区における旧モデルの予測値は実測値を大きく上回った。中粒粗質の土壤は細粒質な土壤に比べて土壤の透水性は高く、保水性は低いため、試験2の土壤は試験1の土壤よりもカリウムが溶脱しやすいと考えられた。

そのため、中粒粗質土壤における各成分の消長係数は、細粒質土壤の消長係数よりも小さくなると考えられた。これらことから、旧モデルの適合性の向上のためには、消長係数を土性に応じた値への改良が必要であると考えられた。

イ 新モデルによる消長係数と予測精度

試験3の化学肥料区における新モデルの式①の値は1978年以降に負の値を示したが(データ略)、式③による下限値の条件式により予測値は実測値と同様に正の値を維持した。

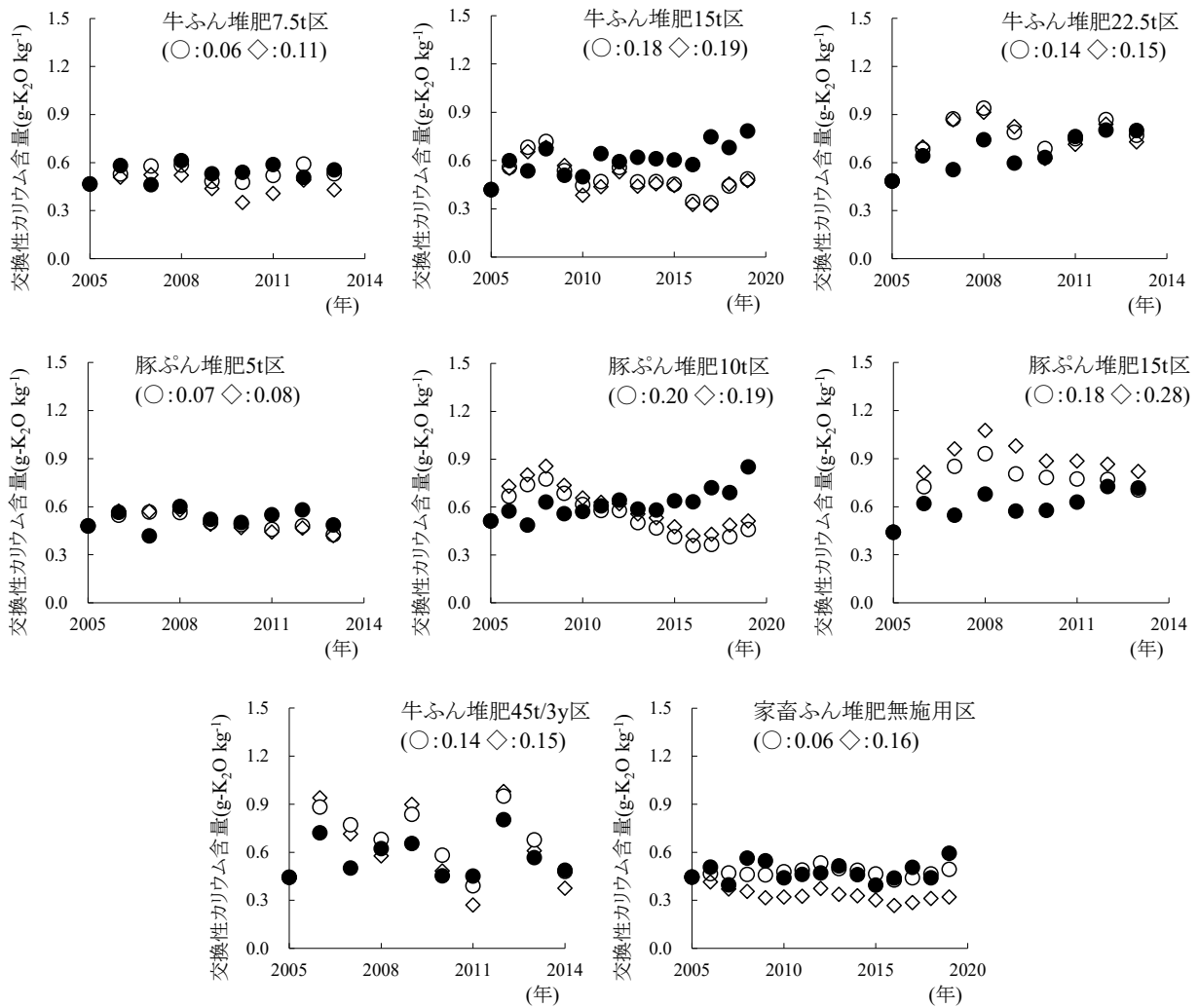


図4 試験1の交換性カリウム含量の実測値(●)、新モデル(○)と旧モデル(◇)の予測値の経時変化
括弧内は各モデルの予測値と実測値の RMSE を示す

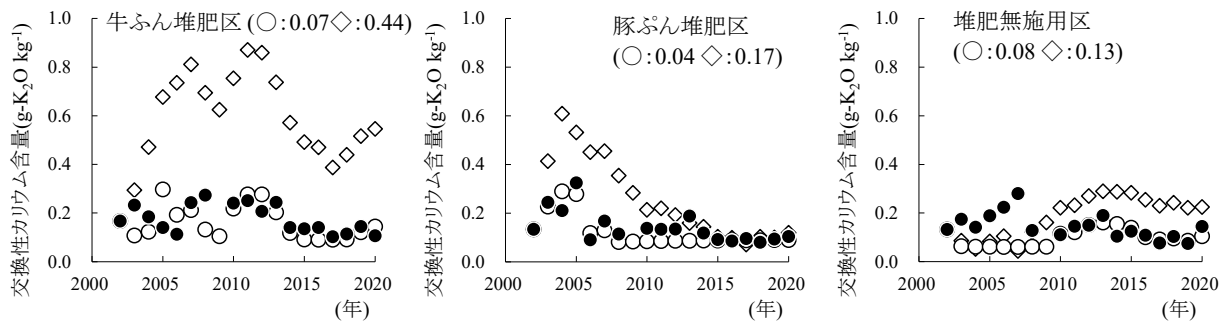


図5 試験2の交換性カリウム含量の実測値(●)、新モデル(○)と旧モデル(◇)の予測値の経時変化
括弧内は各モデルの予測値と実測値の RMSE を示す

このため、新モデルの式③のように下限値を補正する条件式を組み込むことは養分収支に基づくモデルの適合性を高めると考えられた。

補正する下限値の値について、本研究では用いた試験データで最も低かった交換性カリウム飽和度としたが、他の異なる土壌における検証が必要である。しかし、試験2の豚ふん堆肥区は余剰量が負ではなかったものの、2008年以降の新モデルの式①の値は下限値を下回り、さらに2015年以降の新モデルの式①の値は負の値を示したが(データ略)、式③による下限値の補正によって実測値と同程度で推移した。同様に、試験2の堆肥無施用区も2004年、2006年及び2007年に新モデルの式①の値は負の値を示したが(データ略)、式③による下限値の補正によって実測値と同程度で推移した。このことから、本研究で用いた下限値(交換性カリウム飽和度で1.8%に相当する交換性カリウム含量)が他の土壌にも適応する可能性が示された。

消長係数の改良について、旧モデルは堆肥や土壌の種類によらず、一定の値としている⁸⁾。一方、新モデルは土性に応じて異なる消長係数(表10)とすることで、旧モデルの予測値よりも実測値に近い値となった。中村ら⁹⁾は、交換性カルシウム含量及び交換性マグネシウム含量の予測における豚ふん堆肥の消長係数は牛ふん堆肥の消長係数よりも小さく、その要因として豚ふん堆肥からの投入窒素量が牛ふん堆肥よりも多く、交換性カルシウム及び交換性マグネシウムの溶脱量が多かったためと考察している。しかし、試験2の中粗粒質の土壌では、豚ふん堆肥の消長係数は牛ふん堆肥の消長係数よりも大きかった(表10)。また、試験3の豚ふん堆肥30t区は、余剰量が負となった年や、試験1の豚ふん堆肥を施用した3処理区に比べて余剰量は少なかったにも関わらず、実測値は増加傾向を示し(図6)、実測値と予測値の差は他の処理区よりも大きかった。既報⁹⁾とは異なるこれらの結果が得られた要因として、試験2の豚ふん堆肥区における2008年以降の新モデルの式①の値は条件式③の下限値未満で、下限値の補正があったことから実測値と新モデルの予測値の残差平方和を最小とする本改良手法において豚ふん堆肥の消長係数を過大に評価していた可能性が考えられた。また、試験2の豚ふん堆肥区では、化学肥料及び堆肥に由来する窒素の硝酸化成と硝酸イオンの溶脱に伴う交換性カルシウ

ム及び交換性マグネシウムの溶脱によりpH(KCl)が低下したこと²⁴⁾に加えて、非交換性カリウム含量の減少が報告されていること²⁵⁾から、土壌pH低下による鉱物表面の崩壊に伴う非交換性カリウムの放出が考えられた。試験3における実測値と予測値の差については明らかではないものの、同じ畜種の家畜ふん堆肥であっても窒素の無機化率の違いや、窒素の無機化に伴う土壌の酸性化への影響の差異により、交換性カリウムの動態に及ぼす影響が異なることが考えられた。このため、家畜ふん堆肥の消長係数についてはさらなる検討が必要である。しかし、試験1及び試験2における新モデルは、家畜ふん堆肥の種類や施用量が異なっても実測値と同様の变化傾向を示し、新モデルの予測値と実測値のRMSEは、旧モデルの予測値と実測値のRMSEと同程度か、より小さかったことから、新モデルの方が旧モデルよりも適合性は高いと考えられた。

また、本研究では土性を細粒質と中粗粒質の2水準で分けたが、より細かな土性の違いを消長係数に反映させた場合については今後の課題である。

2 現地ほ場における新モデルの適合性の検証

一宮・砂質における可給態リン酸含量及び交換性カリウム含量の実測値は減少傾向を示し、予測値も同様の傾向を示した(図7、図8)。田原・細粒質における可給態リン酸含量及び交換性カリウム含量の予測値も2006年までは実測値と同様に推移したが、2011年以降は実測値との乖離が大きかった。田原・礫質における可給態リン酸含量及び交換性カリウム含量の実測値は、多量に施用された有機質資材の影響を反映して他のほ場に比べて大きく増加し、予測値も同様な傾向を示した。しかし、予測値と実測値のRMSEは他のほ場よりも大きかった。金沢ら²⁶⁾は、牛ふん厩肥の施用により、ほ場内の作土の化学性のパラツキは増大することを報告している。2011年以降の田原・細粒質における予測値と実測値の乖離が大きかったこと、田原・礫質におけるRMSEが大きかった要因として、有機質資材の連続した施用によって、ほ場内の可給態リン酸含量や交換性カリウム含量のパラツキが大きかったことが考えられた。特に、田原・礫質では多量の有機質資材が施用されたため、他のほ場よりもRMSEが大きかったと考えられた。

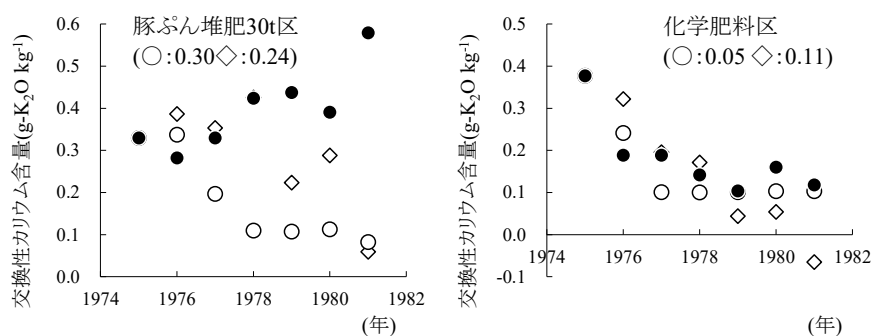


図6 試験3の交換性カリウム含量の実測値(●)、新モデル(○)と旧モデル(◇)の予測値の経時変化
括弧内は各モデルの予測値と実測値のRMSEを示す
1981年は1980年冬作(ムギ)跡地土壌

しかし、現地ほ場のような土性や礫含量、有機質資材の施用歴が異なる土壌において、新モデルは実測値と同様の变化傾向を示した。有機質資材を多量に施用した田原・礫質を除いた他の2ほ場の新モデルの予測値と実測値のRMSEは、試験1～試験3における新モデルの予測値と実測値のRMSEと同程度であったことから、現地ほ場土壌における適合性が示された。

3 可給態リン酸含量及び交換性カリウム含量の予測に向けた新モデルの課題と土壌管理への活用

(1) 可給態画分の予測に向けた養分収支モデルの課題

本研究で予測対象としたトルオーグ法で評価される可給態リン酸の形態は主にカルシウム型リン酸であり、土壌の交換性カルシウム含量が可給態リン酸の蓄積に影響することが示されている²⁷⁾。南條ら²⁸⁾は、リン酸と反応性が高いアルミニウムや鉄含有量が少ないスメクタイト質土壌において、リン酸吸収係数が高い要因は添加したアンモニウムイオンによって交換浸出された交換性カルシウム及び交換性マグネシウムによるリン酸の沈殿によることを明らかにした。このカルシウムとリン酸の化合物はアルミニウムや鉄のリン酸化合物よりも溶解度が高く、リン酸の固定とはみなされない。頁岩風化土のように交換性カルシウム含量が多く、リン酸吸収係数が高い土壌では、リン酸吸収係数として評価されるリン酸の沈殿は可給態リン酸で評価されるカルシウム型リン酸と考えられるため、頁岩風化土におけるリン酸吸収係数を反映した新モデルの消長係数の適合性については検討が必要である。

交換性カリウム含量の予測では、交換性カルシウム含量及び交換性マグネシウム含量と同様に、旧モデルにおいて予測値が負の値を示す場合があったことから、下限値を補

正する条件式(式③)を式①に追加し、予測精度が向上した。愛知県の畑土壌ではリン酸が著しく蓄積しているが³⁾、可給態リン酸含量についても下限値の条件式を組み入れることで予測精度が高まるかどうか検討する必要がある。また、可給態リン酸含量の予測に必要なリン酸吸収係数の測定は煩雑であるが、風乾土含水率による簡易な推定法が考案されている²⁹⁾。本予測技術の普及に向けて、本県の畑土壌においてもリン酸吸収係数の簡易推定法の適用性が解明されることが望ましい。

本研究では露地・非マルチ被覆栽培を対象としたが、マルチ被覆や施設栽培では降雨により流亡する影響は小さくなることから、可給態リン酸や交換性カリウムの土壌の消長係数が露地栽培よりも高くなると考えられた。今後、このようなリン酸やカリウムの動態に影響する土壌管理を加えることで、本予測技術の活用場面が拡大すると考えられるため、今後検討していきたい。

(2) 新モデルの土壌管理への活用

本予測技術はリン酸とカリウムのそれぞれの収支に基づいた予測であることから、栽培品目や施用量の変更に伴う変化を算出しやすい。また、予測対象である可給態リン酸含量及び交換性カリウム含量は土壌診断の測定項目に採用されており、予測値を既存の土壌診断基準³⁾と比較でき、すぐに現場で活用できる。新モデルによって将来の土壌の可給態画分の変化を旧モデルよりも高い精度で予測できることが明らかとなったことから、将来の土壌の可給態画分の変化をふまえた土壌管理を実現し、余剰のリン酸やカリウムの土壌への過剰な蓄積を抑制し、有限な鉱物資源のリン酸やカリウムの効率的かつ適切な施用にさらに寄与すると考える。

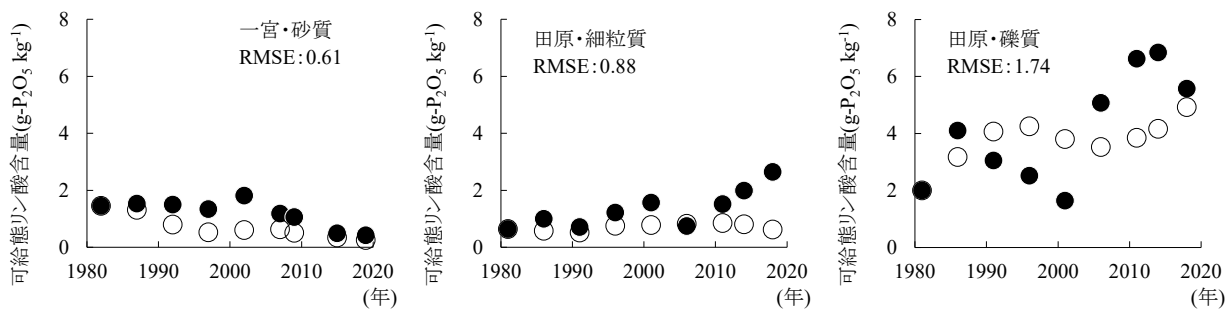


図7 現地ほ場における可給態リン酸含量の実測値(●)、新モデルの予測値(○)の経時変化

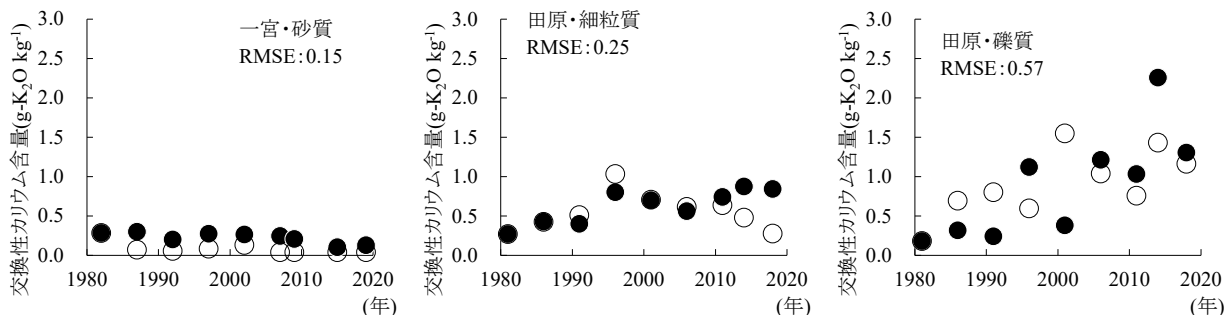


図8 現地ほ場における交換性カリウム含量の実測値(●)、新モデルの予測値(○)の経時変化

引用文献

1. 農林水産省農産局技術普及課. 肥料をめぐる情勢(令和4年4月).
https://www.maff.go.jp/j/seisan/sien/sizai/s_hiryo/attach/pdf/index-7.pdf (2022.8.3参照)
2. 牧田尚之, 久野智香子, 武井真理, 池田彰弘, 吉川那々子. 愛知県の野菜主要産地における施肥量、生産量、養分吸収量及び土壌の化学性. 愛知農総試研報. 45, 11-19(2013)
3. 愛知県農業水産局農政部農業経営課. 農作物の施肥基準. 愛知県. (2021)
<https://www.pref.aichi.jp/soshiki/nogyo-keiei/sehikijun.html> (2022.8.6参照)
4. 糟谷真宏, 荻野和明, 慶戸誠一郎, 石川博司, 鈴木良地. 牛ふん堆肥または豚ふん堆肥を連用する黄色土野菜畑における5年間の養分動態. 愛知農総試研報. 43, 137-149 (2011)
5. 中村嘉孝, 恒川歩, 糟谷真宏. 家畜ふん堆肥を連用した砂質畑土壌における収支、溶脱量及び土壌蓄積量からみた窒素、リン、カリウムの動態. 愛知農総試研報. 48, 17-28(2016)
6. 伊藤豊彰. 家畜排泄物堆肥のリン資源としての有効活用-作物収量確保、土壌リン酸蓄積の抑制及びリン資源節約をめざして-. 畜産環境情報. 57, 1-16(2015)
7. 北村秀教. 土壌塩基類消長の簡易予測方法. 愛知農総試研報. 33, 229-236(2001)
8. 北村秀教. 土壌化学性の簡易な未来予測. 土肥誌. 74, 679-683(2003)
9. 中村嘉孝, 山本拓, 久野智香子, 大橋祥範, 安藤薫, 大竹敏也. 愛知県の畑土壌における土壌炭素動態モデルと養分収支モデルを用いた土壌pHの予測. 愛知農総試研報. 54, 29-42(2022)
10. 農耕地土壌分類委員会. 農耕地土壌分類第3次改訂版. 農業環境技術研究所資料. 17, 1-79(1995)
11. 辻正樹, 山本拓, 糟谷真宏, 鈴木良地, 竹内将充. 牛ふん堆肥を3年一括施用した露地畑における野菜の収量と養分動態. 愛知農総試研報. 48, 91-99(2016)
12. 辻正樹, 山本拓, 糟谷真宏, 鈴木良地. 黄色露地野菜畑のキャベツ-スイートコーン体系にける堆肥連用による施肥量削減. 土肥誌. 89, 232-236(2018)
13. 中村嘉孝, 安藤薫, 瀧勝俊. 土壌炭素動態(RothC)モデルを用いた砂質露地畑における土壌炭素の変動解析と土壌化学性の変動予測の可能性. 愛知農総試研報. 52, 23-30(2020)
14. 愛知県農業総合試験場. 昭和50~57年度土壌環境基礎調査(基準点調査)成績書. p.1-62(1983)
15. 大橋祥範, 伴佳典, 尾賀俊哉, 加藤恭宏, 糟谷真宏. 稲わら堆肥の89年間の連用がイネの収量、リン収支に及ぼす影響. 愛知農総試研報. 47, 23-30(2015)
16. 愛知県. 酸性雨等調査結果. 酸性雨等実態調査結果.
<http://kankyojoho.pref.aichi.jp/Taiki/Taiki/sanseiu.html>(2022.1.27参照)
17. 北村秀教, 今泉諒俊. リン酸富化土壌における施肥りん酸の肥効(3)りん酸施用量と有効態りん酸の集積. 愛知農総試研報. 17, 288-295(1985)
18. Coleman, K. and Jenkinson, D. S. RothC-26.3 A model for the turnover of carbon in soil. Evaluation of Soil Organic Matter Models: Using Existing Long-Term Datasets, Ed. by Powlson, D. S. Smith, P. and Smith, J. U. Springer. Berlin. p.237-246(1996)
<https://www.rothamsted.ac.uk/rothamsted-carbon-model-rothc>(2019.6.5.DL)
19. 中村嘉孝, 山本拓, 久野智香子, 大橋祥範, 山本岳, 安藤薫, 瀧勝俊, 大竹敏也. 有機質資材の施用法が異なる愛知県の露地畑におけるRothamsted Carbon Modelの適合性の検証. 愛知農総試研報. 53, 25-36(2021)
20. 中村嘉孝, 山本拓, 久野智香子, 大橋祥範, 安藤薫, 大竹敏也. 土壌炭素動態モデルを用いた愛知県の畑土壌における土壌化学性の将来予測技術の開発. 土肥誌, 94, 192-195(2023)
21. 農林水産省農蚕園芸局農産課. 土壌環境基礎調査における土壌、水質及び作物体分析法. 土壌保全調査事業全国協議会. 1-202(1979)
22. 小柳歩, 和田富広, 安藤義昭. 家畜ふん堆肥中リン酸の性質と肥効. 新潟県農業総合研究所畜産研究センター研究報告. 15, 6-9(2005)
23. 安藤薫, 糟谷真宏, 中尾淳, 中島聡美, 村野宏達, 中村嘉孝, 瀧勝俊, 矢内純太. 愛知県露地野菜畑土壌における非交換態カリウム含量の規定要因および作物カリウム吸収への寄与. 土肥誌, 94, 163-169(2023)
24. 中村嘉孝, 恒川歩, 糟谷真宏. 家畜ふん堆肥を連用した砂質畑土壌における土壌pHの低下要因. 土肥誌, 89, 227-231(2018)
25. 中村嘉孝, 恒川歩, 糟谷真宏. 家畜ふん堆肥を連用した砂質畑土壌における形態別リン及びカリウムの変化. 土肥要旨集, 62, 114(2016)
26. 金沢晋二郎, 川村征夫, 河合武彦, 広瀬春朗, 森山真明, 熊沢喜久雄, 高井康雄. 畑地圃場における土壌の多点試料間の微生物性および化学性のバラツキ. 肥料科学. 2, 99-110(1979)
27. 安藤薫, 中村嘉孝, 山口紀子, 糟谷真宏, 瀧勝俊. 愛知県露地畑土壌におけるリンの蓄積形態とその可能性. 土肥誌, 93, 197-200(2022)
28. 南條正巳, 牧野知之, 庄司貞雄, 高橋正. スメクタイト質土壌のリン酸吸収係数における交換性イオンの役割. 土肥誌, 62, 41-48(1991)
29. 木下林太郎, 谷昌幸. 風乾土含水率によるリン酸吸収係数推定法の考察-北海道十勝地域および上川地域の普通畑土壌への適用-. 土肥誌, 91, 385-388(2020)